

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.

(19)

JAPANESE PATENT OFFICE

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11) Publication number: **09069562 A**

(43) Date of publication of application: **11.03.97**

(51) Int. Cl

H01L 21/768

H01L 21/265

H01L 21/312

(21) Application number: **07227294**

(22) Date of filing: **10.08.95**

(30) Priority: **14.09.94 JP 06247050**
22.11.94 JP 06312774
27.03.95 JP 07 94318
21.06.95 JP 07179506

(71) Applicant: **SANYO ELECTRIC CO LTD**

(72) Inventor: **WATANABE HIROYUKI**
MIZUHARA HIDEKI
JITSUZAWA YOSHISUE
HIRASE MASAKI
AOE HIROYUKI

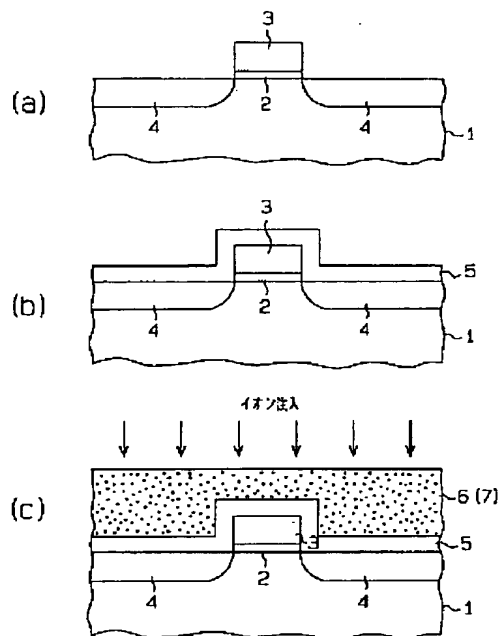
(54) **SEMICONDUCTOR DEVICE AND FABRICATION THEREOF**

(57) Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To decompose the organic components contained in an organic SOG film while reducing moisture and hydroxy group contained therein.

SOLUTION: A gate insulation film 2, a gate electrode 3, and a source-drain region 4 are formed on a single crystal silicon substrate 1. A silicon 5 is then deposited on the entire surface of a device by plasma CVD followed by deposition of organic SOG 6 thereon. Subsequently, the organic SOG 6 is doped with ions selected from a group of silicon fluoride ion, boron fluoride ion, argon fluoride ion, and nitrogen ion thus decomposing the organic components while reducing moisture and hydroxy group contained in the film. Consequently, the organic SOG 6 is changed into a modified SOG 7.

COPYRIGHT: (C)1997,JPO



いる場合には、水分および水酸基を遮断する性質に加えて、電解質および有機酸の強度が高い性質をもつ電解質をSOG膜の上部および下部に形成したサンドウイッチ構造が採用される。そのような電解質としては、通常、CV法によって形成されたシリコン酸化膜が用いられる。

[0009] しかし、有機SOG膜には有機成分が含まれていて、ビアホールを開けようとする際のエッチング時に、有機SOG膜中に含まれる水分および下部のシリコン酸化膜に比べて有機SOG膜が劣化して、エッチングされる。また、エッチングマスクとして用いるフォトリソレジストを除く際のエッチング処理時には、有機SOG膜中に含まれる有機成分も分解するため、有機SOG膜が収縮する。その結果、有機SOG膜にクラックが生じたり、有機SOG膜部分が使用してリセスが発生してしまったり、リセスが発生すると、スパッタ法を用いて配線形成する際に、良好なコンタクトが得られなくなること高、リセスはレトログレッション (Retraction) という。また、有機SOG膜中に含まれる有機成分が分解すると、有機SOG膜の吸湿性が高まる。ちなみに、これらの問題については、(C, K. Wang, L. M. Liu, H. C. Cheng, H. C. Huang, M. S. Lin, Proc. of IEEE VLSI, p. 101 (1994).) に詳しい。

[0010] そこで、特開平1-307247号公報に開示されるように、有機SOG膜に酸素プラズマ処理を施すことで、有機SOG膜中のC-Si結合をSi-O結合に変化させ、有機SOG膜に含有される有機成分を分解する方法が提案されている。

[0011] 図44に、有機SOG膜の酸素プラズマ処理前後の吸収スペクトルを示す。尚、有機SOG膜の組成は $(\text{CH}_3\text{Si}(\text{OH})_3)_n$ で、その膜厚は3000Åである。その形成方法は、まず、前記組成のシリコン化合物のエタノール溶液を基板上に滴下して基板を回転速度: 4800 rpm で20秒間回転させ、当該溶液の液膜を基板上に形成させる。次に、室温雰囲気中において、100度で1分間、200度で1分間、300度で1分間、22度で1分間、300度で30分間、順次熱処理が施されて有機SOG膜が形成される。続いて、処理時間: 60秒間、蒸留液流 (RF Power): 500 W、設定温度: 360度、酸素流量: 600sccmの条件下で有機SOG膜に酸素プラズマ処理が施される。

[0012] 図44において、グラフ44-1は有機SOG膜の形成直後 (酸素プラズマ処理が施される前)、グラフ44-2は酸素プラズマ処理が施された直後、グラフ44-3は酸素プラズマ処理が施されてから24時間以内で最大に3日間開通された後、グラフ44-4は酸素プラズマ処理が施されてから24時間以内で最大に7日間開通された後の有機SOG膜の赤外吸収スペクトルである。

[0013] グラフ44-1に示すように、酸素プラズマ処理前には、波数 (WAVE NUMBER): 約3000 cm^{-1} と1250 cm^{-1} 付近に有機成分に起因する吸収ピークが見られ、尚、約3000 cm^{-1} 付近の吸収ピークはC-H結合の伸縮に起因し、1250 cm^{-1} 付近の吸収ピークはC-H結合の歪曲に起因するものである。しかし、グラフ44-2〜44-4に示すように、酸素プラズマ処理後は約3000 cm^{-1} および1250 cm^{-1} 付近に吸収ピークが見られ、従って、酸素プラズマ処理により、有機SOG膜に含まれる有機成分が分解されているのがわかる。

[0014] しかし、グラフ44-2に示すように、酸素プラズマ処理直後は約3000 cm^{-1} および930 cm^{-1} 付近に有機成分に起因する吸収ピークが見られる。尚、3600 cm^{-1} 付近の吸収ピークはH-OH、Si-OHのO-H結合の伸縮に起因し、930 cm^{-1} 付近の吸収ピークはSi-OHのSi-O結合の伸縮に起因するものである。また、グラフ44-2〜44-4に示すように、3600 cm^{-1} および930 cm^{-1} 付近の吸収ピークは酸素プラズマ処理が施されてから時間を経るほど大きくなる。これは、酸素プラズマ処理が施された有機SOG膜が水分を吸収して、水分が吸収されて、有機SOG膜は水分中の水分を吸収して、3600 cm^{-1} および930 cm^{-1} 付近の吸収ピークは時間を経るほど大きくなる。しかし、酸素プラズマ処理が施された場合には、その吸収ピークの増大がより顕著となる。

[0015] このように、有機SOG膜に酸素プラズマ処理を施す方法には、有機成分が分解されるという利点がある反面、膜中に含まれる水分および水酸基が増大するという欠点がある。

[0016] SOG膜に含まれる水分および水酸基が増大するとボイズンドピアなどの不良が起る。ボイズンドピアとは、配線に金属を用いた場合、ビアホール部から露出しているSOG膜に含まれる水分により、ビアホール部の配線が腐食される現象である。また、ビアホール部に露出しているSOG膜に含まれる水分とビアホール部の配線とが反応し、コンタクト抵抗が高くなるという問題もある。ちなみに、これらの問題については、(C. Chiang, N. Y. Lam, J. K. Chu, N. Cox, D. Fraser, J. Bozarth, B. Mumford, Proc. of IEEE VLSI, p. 404 (1987).) に詳しい。

[0017] これを防止するには、前記サンドウイッチ構造 (CV法) によって形成されたシリコン酸化膜をSOG膜の上部および下部に形成する構造を採用し、共に、上部のシリコン酸化膜を形成する前にSOG膜をエッチバックすればよい。そうすれば、ビアホールの断面が上部および下部のシリコン酸化膜だけで形成され、ビアホール部にSOG膜が露出しないようになる。しかし、SOG膜をエッチバックする工程が必要になるため、その分だけ製造工程が複雑化してスループットが低下するという問題がある。

[0018] そこで、有機SOG膜にイオン注入法を用いてフッ素をドーピングすることで、有機成分を分解させると共に、膜中に含まれる水分および水酸基を減少させる方法が提案されている (L.-J. Chen, S.-T. Hsiao, J.-L. L. eu, Proc. of IEEE VLSI, p. 81 (1994). 参照)。同論文には、膜厚: 4000Åの有機SOG膜へ、加速エネルギー: 10keV、または80keVで、ドーズ量: $3 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$ のフッ素イオンを注入し、425度で30分間の熱処理を施した結果、有機SOG膜に含まれる水分を減少させることができたことが示されている。

[0019] また、有機SOG膜にイオン注入法を用いてシリコンまたはリンをドーピングすることで、有機成分を分解させる方法が提案されている (N. Moriya, Y. Shao, R. Kalish, J. Electrochem. Soc., Vol. 140, No. 5, p. 1442 (1993). 参照)。

[0020] ちなみに、有機SOG膜にアルゴン、窒素、酸化窒素 (N_2O) などのプラズマ処理を施すことで、有機成分を分解させる方法も提案されている (C. K. Wang, L. M. Liu, H. C. Cheng, H. C. Huang, M. S. Lin, Proc. of IEEE VLSI, p. 101 (1994). M. Matsura, Y. Li, K. Shibata, Y. Hayashida, H. Kotani, Proc. of IEEE VLSI, p. 113 (1993). 参照)。

[0021] 発明が解決しようとする課題は、有機SOG膜にイオン注入法を用いてフッ素をドーピングする方法には、以下の問題がある。

[0022] (1) 配線にアルミニウムが用いられた場合、SOG膜中のフッ素によってアルミニウムが腐食される (Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 31 (1992) pp. 2045-2048 Part 1, No. 6B, June 1992. 参照)。

[0023] (2) MOSトランジスタの上にフッ素をドーピングしたSOG膜が形成された場合、SOG膜中のフッ素によってゲート絶縁膜が低誘電率化されるため、ゲート絶縁膜の効率的な駆動が阻害される。その結果、閾値電圧が変化するなど、MOSトランジスタの基特性が設計値とは異なるものになる。

[0024] (3) MOSトランジスタの上にフッ素をドーピングしたSOG膜が形成され、ソース・ドレイン領域がリンまたはボロンの不純物添加によって形成されている場合、SOG膜中のフッ素によって当該不純物添加が抑制される。その結果、MOSトランジスタの基特性が設計値とは異なるものになる。

[0025] また、有機SOG膜にイオン注入法を用いてリンまたはリンの化合物をドーピングする方法には、配線にアルミニウムが用いられた場合、SOG膜中の水分とリンとが反応してリン酸 (H_3PO_4) が生成され、そのリン酸によってアルミニウムが腐食されるという問題がある。

[0026] そして、有機SOG膜にイオン注入法を用いてシリコンまたはシリコンの化合物をドーピングする方法

には、SOG膜の導電性が高くなり短絡絶縁としての機能が劣化するという問題がある。

[0027] 本発明は上記問題点を解決するために、なされたものであって、以下の目的を有するものである。

1) SOG膜に含まれる水分および水酸基を減少させることが可能な半導体装置の製造方法を提供する。

[0028] 2) SOG膜に含有される有機成分を分解させると共に、膜中に含まれる水分および水酸基を減少させることが可能な半導体装置の製造方法を提供する。

3) 平坦性に優れ、ボイズンドピアなどの不良を回避することが可能な短絡絶縁を備えた半導体装置を提供する。

[0029]

【課題を解決するための手段】 請求項1に記載の発明は、SOG膜にイオン注入を行う工程を備えたことをその要旨とする。

[0030] 請求項2に記載の発明は、不活性ガスイオン、III b, IVb, Vb, VIb, VII b, IVa, Vaの各族の元素単体イオン、またはこれら元素の化合物イオンからなるグループから選択された少なくとも一つのイオンをイオン注入法を用いてSOG膜にドーピングする工程を備えたことをその要旨とする。

[0031] 請求項3に記載の発明は、不活性ガスイオン、ボロン、窒素、酸素、アルミ、イオウ、炭素、ガリウム、ゲルマニウム、ヒ素、セレン、臭素、アンチモン、ヨウ素、インジウム、スズ、テルル、鉛、ビスマス、チタン、ニオブ、ハフニウム、タンタルの元素単体イオンまたはこれら元素の化合物イオン、フッ素の化合物イオンからなるグループから選択された少なくとも一つのイオンをイオン注入法を用いてSOG膜にドーピングする工程を備えたことをその要旨とする。

[0032] 請求項4に記載の発明は、不活性ガスイオン、ボロンもしくはヒ素の元素単体イオン、またはこれら元素の化合物イオンからなるグループから選択された少なくとも一つのイオンをイオン注入法を用いてSOG膜にドーピングする工程を備えたことをその要旨とする。

[0033] 請求項5に記載の発明は、請求項1〜4のいずれか1項に記載の半導体装置の製造方法において、前記SOG膜は有機SOG膜または無機SOG膜であることをその要旨とする。

[0034] 請求項6に記載の発明は、請求項1〜5のいずれか1項に記載の半導体装置の製造方法によって形成されたSOG膜を多層配線間の短絡絶縁として用いることをその要旨とする。

[0035]

【発明の実施の形態】

(第1実施形態) 以下、本発明を具体化した第1実施形態の製造方法を図1および図2に従って説明する。

[0036] まず、図1(a)に示すように、(10) p層 (またはn層) 単結晶シリコン基板1の上にゲ

ート絶縁膜2 (厚さ: 100 Å) およびゲート電極3 (厚さ: 2000 Å) が形成される。そして、ゲート絶縁膜2およびゲート電極3をマスクとするイオン注入法を用いて、基板1にn型(またはp型)不純物がドーピングされ、ソース・ドレイン領域4が自己整合的に形成されてMOSトランジスタが完成される。

【0037】次に、図1(b)に示すように、プラズマCVD法を用いて、デパバイスの全面にシリコン酸化膜5 (厚さ: 1500 Å) が形成される。尚、このプラズマCVD法で用いられるガスは、モノシランと酸化炭素 ($\text{SiH}_4 + \text{H}_2 + \text{N}_2\text{O}$)、モノシランと酸素 ($\text{SiH}_4 + \text{O}_2$)、TEOS (Tetra-ethoxy-silane) と酸素 ($\text{TEOS} + \text{O}_2$) などであり、成膜温度は300～900℃である。

【0038】続いて、図1(c)に示すように、シリコン酸化膜5の上に有機SOG膜6が形成される。有機SOG膜6の組成は $[\text{C}_2\text{H}_3\text{Si}(\text{OH})_3]$ で、その膜厚は4000 Åである。その形成方法は、まず、前記組成のシリコン化合物のエタノール溶液を基板1の上に滴下し、基板を回転速度: 4800 rpmで20秒間回転させ、並進溶剤の液滴を基板1の上に形成させる。このとき、そのエタノール溶液の液滴は、基板1上の微塵に対して、その内部には溶け、その表面には溶け、微塵を被覆するよう形成される。その結果、エタノール溶液の液滴の表面は平坦化される。次に、室温で乾燥中において、100℃で1分間、200℃で1分間、300℃で1分間、22℃で1分間、300℃で30分間、順次熱処理が行われると、エタノールが蒸発すると共に重合反応が進行して、表面が平坦な有機SOG膜6が形成される。

【0039】そして、イオン注入法を用いて後記するグループから選択された一つのイオンを有機SOG膜6にドーピングすることで、有機成分を分解させると共に、膜中に含まれる水分および水蒸気を減少させる。その結果、有機SOG膜6は、有機成分が含まれず、水分および水蒸気が含まれなくなるSOG膜 (以下、改質SOG膜という) 7に変わられる。

【0040】次に、図2(a)に示すように、プラズマCVD法を用いて、改質SOG膜7の上にシリコン酸化膜8 (厚さ: 200 Å) が形成される。シリコン酸化膜8の形成条件はシリコン酸化膜5と同じである。

【0041】続いて、図2(b)に示すように、四フッ化炭素と水素の混合ガスをエッチングガスとして用いる湿式エッチングが行われ、ソース・ドレイン領域4の上の各膜5～8にビアホール9が形成される。

【0042】次に、図2(c)に示すように、スパッタ法を用いてビアホール9内を含むデパバイスの全面にアルミニウム膜が堆積され、そのアルミニウム膜が所望のパターンになるように異方性エッチングが行われ、ソース・ドレイン電極 (ソース・ドレイン電極) 10が形成される。

【0043】本実施形態の製造方法によれば、以下の作用および効果を得ることができる。

①シリコン酸化膜5と改質SOG膜7とシリコン酸化膜8とからなる3層構造の絶縁膜11がMOSトランジスタの上に形成されている。改質SOG膜7は有機SOG膜6と同様に、分子構造上、アルキル基またはアリール基で結合している部分があるため、熱処理時におけるクラックの発生が抑制され、膜厚が0.5～1.0μm程度にすることができ、従って、改質SOG膜7を用いれば、絶縁膜11の膜厚を大きくすることができ、基板1上の大きな微塵に対して十分な平坦化が可能になる。

【0044】②各シリコン酸化膜5、8と改質SOG膜7が堆積されたサンドウィッチ構造が採用されているのは、絶縁膜11全体としての絶縁性および機械的強度を高めるためである。また、シリコン酸化膜5が設けられているのは、改質SOG膜7に腐食に耐えられ、水分および水蒸気がMOSトランジスタに与える影響を無くするためである。そして、シリコン酸化膜8が設けられているのは、改質SOG膜7が大気中の水分を吸収するのを防ぐためである。

【0045】③改質SOG膜7には有機成分が含まれていないため、ビアホール9を形成するためのエッチングを、四フッ化炭素と水素の混合ガスの空間中に行うことができる。そのため、当該エッチングにおいて、エッチングマスクとしてフォトリソレジストを用いた場合でも、そのフォトリソレジストが侵食されることはなく、そのフォトリソレジストがマスキングされている改質SOG膜7がエッチングされることもない。従って、微細なビアホール9を正確に形成することができる。

【0046】④改質SOG膜7には有機成分が含まれていないため、改質SOG膜7のエッチングレートは各シリコン酸化膜5、8と同じになる上に、エッチングマスクとして用いたフォトリソレジストを除去する際のエッチング処理時に改質SOG膜7が吸収することはない。そのため、改質SOG膜7にクラックが生じることはなく、ビアホール9を形成する際にリセスが発生することはない。従って、ビアホール9内にアルミニウム膜を十分に埋め込むことが可能になり、ソース・ドレイン電極10とソース・ドレイン領域4との間のコンタクトを良好にすることができ、

【0047】⑤改質SOG膜7には有機成分が含まれず、水分および水蒸気が含まれなくなるため、各シリコン酸化膜5、8を省いて改質SOG膜7を単層で用いることもできる。

【0048】(第2実施形態) 次に、本発明を具体化した第2実施形態の製造方法を図3および図4に従って説明する。尚、本実施形態において、第1実施形態と同じ構成部材については符号を等しくしてその詳細な説明を省略する。

【0049】まず、図3(a)に示すように、p型(またはn型)単結晶シリコン基板1の上にゲート絶縁膜2およびゲート電極3が形成され、ソース・ドレイン領域4が形成されてMOSトランジスタが完成される。そして、デパバイスの全面に絶縁膜21が形成され、ソース・ドレイン領域4の上の絶縁膜21にビアホール22が形成される。その後、スパッタ法を用いてビアホール22内を含むデパバイスの全面にアルミ膜が堆積され、そのアルミ膜が所望のパターンになるように異方性エッチングが行われ、ソース・ドレイン電極 (ソース・ドレイン電極) 10が形成される。

【0050】次に、図3(b)に示すように、デパバイスの全面にシリコン酸化膜5が形成される。続いて、図3(c)に示すように、シリコン酸化膜5の上に有機SOG膜6が形成され、イオン注入によって有機SOG膜6は改質SOG膜7に変わられる。

【0051】そして、図4(a)に示すように、改質SOG膜7の上にシリコン酸化膜8が形成され、絶縁膜11が形成される。次に、図4(b)に示すように、四フッ化炭素と水素の混合ガスをエッチングガスとして用いる湿式エッチングが行われ、各膜5～8にビアホール9が形成される。

【0052】続いて、図4(c)に示すように、スパッタ法を用いてビアホール9内を含むデパバイスの全面にアルミ膜が堆積され、そのアルミ膜が所望のパターンになるように異方性エッチングが行われ、絶縁膜23が形成される。

【0053】このように、本実施形態では、第1実施形態としてのソース・ドレイン電極10の上に、絶縁膜11を介して第2絶縁膜としての絶縁膜23が形成されている。この場合でも、MOSトランジスタおよび第1配線層に影響を及ぼすことなく第1実施形態と同様の作用および効果を得ることができる。

【0054】改質SOG膜7の構造および各種特性(次に、改質SOG膜7の構造および各種特性について調べた結果を述べる。改質SOG膜7の構造については、FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) 法、SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy) 法、ESR (Electron Spin Resonance) 法、TDS (Thermal Desorption Spectroscopy) 法を用いて評価し、プラズマ耐性、および吸湿性の評価結果とあわせて検討した。改質SOG膜7の電気的特性については、アルミニウム電極を用いたMOS (Metal Oxide Semiconductor) キャパシタを作成し、高周波IV (Capacitance Voltage) 法を用いて評価した。

【0055】①膜の安定性に関して、耐熱性、プラズマ耐性、水分透過性、吸湿性に着目して評価した。耐熱性は、室温雰囲気中で処理した後の膜の酸化に着目して評価した。また、TDS法を用いて吸湿するガスを分析し、FT-IR法による赤外線吸収スペクトル (FT-IR スペク

トル) の変化と比較して検討した。プラズマ耐性は、プラズマ(レジストをエッチングする条件)に晒した後、膜の酸化や赤外線吸収スペクトルの変化に着目して評価した。吸湿性や水分透過性については、クリンナー試験内に設置した後、およびプレッシャー・ケルビン試験 (PCT) を行った前後の赤外線吸収スペクトルの変化に着目して評価した。各SOG膜6、7の膜厚は、断面SEM (Scanning Electron Microscope) 法を用いて評価した。各SOG膜6、7の電気的特性は、(100) n型単結晶シリコン基板上にアルミニウム電極を用いたMOSキャパシタを作成し、高周波IV法 (Capacitance Voltage) を用いて評価した。MOSキャパシタは電極形成後に、フォーミングガス (H₂/N₂) 中で450℃で15分の熱処理を施した。

【0056】②A. 改質SOG膜7の構造変化
図5に、有機SOG膜6に種々のイオンが注入された直後の赤外線吸収スペクトルをFT-IR法によって測定した結果を示す。尚、イオン注入の条件は、加速エネルギー: 100keV、ドーズ量: $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ であり、イオン注入後に300℃で30分間の熱処理が行われる。また、イオン注入後の熱処理については省いても同様の結果を得ることができる。

【0057】図5において、グラフ5-1は有機SOG膜6の形成直後 (イオン注入が行われる前)、グラフ5-2はフッ化シリコン (SiF_3) イオンが注入された直後、グラフ5-3はフッ化硼 (BF_2) イオンが注入された直後、グラフ5-4はアルゴンイオンが注入された直後、グラフ5-5はリンイオンが注入された直後、グラフ5-6はシリコンイオンが注入された直後、グラフ5-7はボロンイオンが注入された直後、グラフ5-8はフッ素イオンが注入された直後の改質SOG膜7の赤外線吸収スペクトルである。

【0058】グラフ5-1に示すように、イオン注入前には、波数 (WAVE NUMBER) : 約3000 cm^{-1} と1250 cm^{-1} 付近に有機成分に起因する吸収ピークが見られる。尚、約3000 cm^{-1} 付近の吸収ピークはC-H結合の伸縮に起因し、1250 cm^{-1} 付近の吸収ピークはC-H結合の変角に起因するものである。しかし、グラフ5-2～5-8に示すように、イオン注入後は約3000 cm^{-1} および1250 cm^{-1} 付近に吸収ピークが見られなくなる。また、グラフ5-2～5-8に示すように、注入するイオン種を変えても改質SOG膜7の赤外線吸収スペクトルは変化しないことがわかる。従って、イオンが注入されることで、有機SOG膜6に含まれる有機成分が分解されること、有機SOG

【0059】ところで、改質SOG膜7に水分および水蒸気が含まれているならば、図4に示す簡易プラズマ処理を施した場合のように、3600 cm^{-1} および930 cm^{-1} 付近に水蒸気による吸収ピークが見られるはずである。尚、3600 cm^{-1} 付近の吸収ピークはH-OH、Si-O

OHのO-H結合の伸縮に起因し、930 cm⁻¹付近の吸収ピークはSi-OHのSi-O結合の伸縮に起因するものである。しかし、グラフ5-2-5-8には、そのような吸収ピークは見られない。従って、イオンが注入された直後には、有機SOG膜6に比べて改質SOG膜7に含まれる水分および水酸基が減少していることがわかる。

【0060】図6に、有機SOG膜6にイオンが注入された直後の赤外線吸収スペクトルをFT-IR法によって測定した結果を示す。尚、イオン注入の条件およびイオン種は図3におけるそれと同じであり、イオン種を変えても改質SOG膜7の赤外線吸収スペクトルは変化しない。

【0061】図6において、グラフ6-1は有機SOG膜6の形成直後、グラフ6-2はイオンが注入された直後、グラフ6-3はイオンが注入されてからクリンルーム内で大気中に1日間曝された後、グラフ6-4はイオンが注入されてからクリンルーム内で大気中に10日間曝された後の改質SOG膜7の赤外線吸収スペクトルである。

【0062】グラフ6-2-6-4に示すように、イオン注入が行われてから時間を経ても3600cm⁻¹および930cm⁻¹付近の吸収ピークはほとんど大きくならない。従って、改質SOG膜7に含まれる水分および水酸基の量を経ても増大しないことがわかる。一方、図4に示すように、酸基プラズマ処理が施された有機SOG膜では、3600cm⁻¹および930cm⁻¹付近の吸収ピークが時間を経ると大きくなくなっている。つまり、酸基プラズマ処理が施された有機SOG膜に比べて、改質SOG膜7の吸水性は低下していることがわかる。

【0063】図7および図8に、有機SOG膜6に注入するイオンのドーピング量を変化させた場合の赤外線吸収スペクトルをFT-IR法によって測定した結果を示す。尚、イオン注入の条件は、図7に示すのは加速エネルギー：30keVの場合、図8に示すのは加速エネルギー：140keVの場合であり、それぞれイオン注入後に300℃で30分間の熱処理が行われる。尚、イオン注入後の熱処理については同じような結果を得ることができ。また、注入するイオン種については図5に示したのと同じであり、イオン種を変えても改質SOG膜7の赤外線吸収スペクトルは変化しない。

【0064】図7および図8において、グラフ7-1およびグラフ8-1は有機SOG膜6の形成直後、グラフ7-2およびグラフ8-2はドーピング量：1×10¹⁴cm⁻²、グラフ7-3およびグラフ8-3はドーピング量：1×10¹⁵cm⁻²、グラフ7-4およびグラフ8-4はドーピング量：1×10¹⁶cm⁻²の場合の赤外線吸収スペクトルである。

【0065】グラフ7-1-8-4に示すように、イオンのドーピング量が増えるほど3600cm⁻¹および930cm⁻¹付近の吸収ピークが小さくなっていく。従って、注入されるイオンのドーピング量を増やすことにより、改質SOG膜7

に含まれる水分および水酸基が減少することがわかる。但し、ドーピング量：1×10¹⁴cm⁻²の場合には、有機SOG膜6の形成直後よりも膜中に含まれる水分および水酸基が増大している。しかし、図4に示すプラズマ処理を施した場合に比べれば、その増大の割合は極めて小さい。

【0066】このように、本発明形態によれば、有機SOG膜7に含まれる水分および水酸基が増大しないため、有機SOG膜6をエッチバックする工程を省くことなく、ピエゾホール9においてホイズンドリアなどの不良が起こるのを防止することができる。従って、本発明形態によれば、有機SOG膜に酸基プラズマ処理を施す従来例に比べて製造工程が簡単になり、スループットを向上させることができる。

【0067】図9に、有機SOG膜6にアルゴンイオンが注入された直後の赤外線吸収スペクトルをFT-IR法によって測定した結果を示す。尚、イオン注入の条件は、加速エネルギー：140keV、ドーピング量：1×10¹⁵cm⁻²である。

【0068】改質SOG膜7では、-CH₃ (4300cm⁻¹付近)やSi-CH₃ (1250cm⁻¹付近)に関する吸収ピークが見られない。これは有機SOG膜6中の有機成分が分解したことを示唆している。また、O-H (3300cm⁻¹付近)やSi-O (1100cm⁻¹付近)の吸収強度は、イオン注入前後で、あまり大きな変化が無いことも分かる。

【0069】アルゴンは不活性な元素であるので、注入されたイオン衝撃のエネルギーが、上記過程の主たる要因であると考えられる。さらに、図5に示すように、その他のイオンでも同様の結果が得られており、注入するイオン種に依存しない過程が生じる要因であることを示唆している。また、有機SOG膜6中に含まれている化学結合の結合エネルギー (Si-O: 800kJ/mol、Si-C: 452 kJ/mol、C-H: 338kJ/mol、O-H: 428kJ/mol) に着目すると、Si-Oの結合エネルギーは他の結合の2倍程度大きい。その結果として、Si-O結合の切断は顕著でなく、C-H結合が優先的に切断されていると考えられる。さらに、改質SOG膜7の赤外線吸収スペクトルにおいて、900cm⁻¹付近と2100-2300cm⁻¹に吸収ピークが新たに発生することが分かった。これらの吸収は、Si-H結合に関するものと考えられる。

【0070】<A-2、炭素濃度(SIMS法)>図10に、イオン注入によって分解された有機成分(特に、炭素)の存在の有無を調べることを目的として、イオン注入前後の炭素濃度の深さ方向分布についてSIMS法を用いて評価した結果を示す。尚、イオン注入の条件は、加速エネルギー：140keV、ドーピング量：1×10¹⁵cm⁻²である。図10から、A-1で示すように有機成分が分解しても、ほとんどの炭素原子は膜中に残留していることが分かった。このとき、炭素濃度は膜中で均一であり、イ

オン注入前後で炭素濃度の分布の変化がないことが分かった。この結果は、炭素は揮発性化合物に変化せず、膜中に留まっていたことを示唆している。また、その他のイオン(例えば、フッ素や塩素など)を注入した場合も、炭素の濃度分布が変化せず、膜中に残留していることを確認した。

【0071】尚、RDS (Rutherford Back Scattering method) による膜中の平均原子数の比は、有機SOG膜6ではO/Si:1.67、C/Si:0.3、改質SOG膜7ではO/Si:1.72、C/Si:0.3である。

【0072】一方、酸基プラズマ処理を用いて改質した場合、有機SOG膜6中の炭素(プラズマ処理前は5×10²²cm⁻³)が1×10¹⁹cm⁻³程度に減少することが既報に報告されている(C. K. Wang, L. M. Liu, H. C. Chen, H. C. Huang, M. S. Lin, Proc. of IEEE VLSI, p. 101 (1994), 参照)。イオン注入法を用いた改質SOG膜7では、炭素がほとんど残留しているの、酸基プラズマ処理を用いた場合とは異なる特性をもつことが期待される。

【0073】<A-3、ダンダリングバンド(ESR法)>図11に、有機SOG膜6にアルゴンイオンが注入された直後のダンダリングバンドをESR法によって測定した結果を示す。尚、イオン注入の条件は、加速エネルギー：140keV、ドーピング量：1×10¹⁵cm⁻²である。

【0074】有機SOG膜6では、基板表面に存在するPbセリウム(2g-2.005g)以外には観測されなかった。このときのPbセリウムの濃度は3.2×10¹²cm⁻²であった。一方、改質SOG膜7では、炭素のダンダリングバンド(g=2.0025)が観測されるようになる。このときの炭素のダンダリングバンドの濃度は3.0×10¹⁵cm⁻²であった。

一方、図10の炭素濃度を深さ方向に積分すると炭素原子の本数である、5×10¹⁷cm⁻²となる。炭素には結合手が4本あるので、全ての炭素の結合手が未結合である場合、2×10¹⁸cm⁻²のダンダリングバンドが存在することになる。ところが、実際に観測された炭素のダンダリングバンドの濃度が3.0×10¹⁵cm⁻²であることから、膜中炭素の結合手の99.85%は、膜中に存在する原子(炭素、炭素、シリコン)と結合していることに等しい。さらに、図9で、炭素と水素の結合に関する吸収は観測されていないので、炭素同士で結合しているか、またはシリコンや炭素と結合していることが推定される。

【B、改質SOG膜7の安定性】<B-1、耐熱性>耐熱性の指標として、まず、改質SOG膜7の膜厚減少に着目して評価した。図12に、有機SOG膜6にアルゴンイオンを注入して形成した改質SOG膜7を炭素酸雰囲気中で30分間の熱処理を施したときの膜厚変化について示す。尚、イオン注入の条件は、加速エネルギー：140keV、ドーピング量：1×10¹⁵cm⁻²である。

【0075】有機SOG膜6に熱処理を施した場合、熱処理温度が高くなるに従って膜厚が減少する。この膜厚減少は、熱処理温度が高くなると膜が緻密になることが原因であると考えられる。一方、改質SOG膜7は800℃で熱処理しても膜厚が減少しない。また、改質SOG膜7の膜厚は有機SOG膜6を800℃で熱処理した場合の膜厚と同程度になっている。これから、改質SOG膜7では、有機SOG膜6を800℃で熱処理した場合と同程度まで膜が緻密化していることがわかる。

【0076】<B-2、熱処理ガス特性>図13に、有機SOG膜6にアルゴンイオンを注入して形成した改質SOG膜7を炭素酸雰囲気中で30分間の熱処理を施し、FT-IR法を用いて評価した結果を示す。400℃以上の熱処理では、温度を上げることによって、Si-Hに関する吸収が徐々に減少していることが分かる。

【0077】図14に、改質SOG膜7を炭素酸雰囲気中で30分間の熱処理を施し、TDS法を用いて評価した結果を示す。尚、イオン注入の条件は、加速エネルギー：140keV、ドーピング量：1×10¹⁵cm⁻²である。

【0078】400℃以上の熱処理では水素の脱離が観測される。FT-IR法で観測されたSi-Hに関する平均値される吸収ピークの方向と傾向が一致するので、Si-Hから解離した水素がTDS分析で観測されたものと考えられる。この結果、900cm⁻¹付近と2100-2300cm⁻¹の吸収はSi-Hに関する吸収であると考えられる。このことは、これまでに報告されていない。

【0079】イオンを注入することによって形成されるSi-H結合の形成過程には、イオン衝撃によって解離した水素(①メチル基を構成する炭素から解離した水素、②Si-OHまたはH₂Oから解離した水素)が関与していると考えられる。すなわち、炭素や炭素が解離することによって形成されたシリコンのダンダリングバンドを、①または②の水素が充填していると考えられる。

【0080】さらに、TDS法を用いて改質SOG膜7と有機SOG膜6とを比較したところ、改質SOG膜7における各/eの相対強度は、H₂O(w/e=2);13、CH₃(w/e=15);0.1、H₂O(w/e=18);0.1、CO(w/e=28);2.4、CO₂(w/e=44);2.5である。一方、有機SOG膜6における各/eの相対強度は、H₂O(w/e=18);2.0、CO、CO₂で同じ1.0である。このように、改質SOG膜7の方が、H₂O(w/e=18)やCH₃(w/e=14、15)に関する脱離が少なく、H₂O(w/e=2)やCO₂(w/e=28、44)が多いことが分かった。

【0081】<B-3、プラズマ耐性>炭素プラズマ耐性の指標として、改質SOG膜7の膜厚減少に着目して評価した。図15に、有機SOG膜6にアルゴンイオンを注入して形成した改質SOG膜7を炭素プラズマに曝したときの膜厚変化について示す。尚、イオン注入の条件は、加速エネルギー：140keV、ドーピング量：1×10¹⁵cm⁻²である。

2-である。

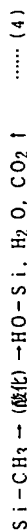
【0082】有機SOG膜6を酸素プラズマに晒した場
合、膜が10%減少したのに対して、改質SOG膜7は
酸素プラズマに晒した場合は、膜が減少しないことが
分かった。但し、改質SOG膜7の膜厚は有機SOG膜
6に比べて25%減少している。以上の結果から、有機成
分が分解して消滅するような条件でイオン注入した場
合、酸素プラズマに晒した膜に改質されていること
が分かった。また、酸素プラズマに晒した場合よりもイ
オン注入した場合の方が膜厚減少が大きいことから、イ
オン注入した方が膜の密度が大いと考えられる。

【0083】次に、イオン注入法を用いて膜表面だけを
改質した場合のアッシング特性を評価した。図16に、
アッシング処理前後の赤外線吸収スペクトルをFT-IR法で
測定した結果を示す。アッシングは、波長2400nm、パワ
ーを用いて、膜が10.4nmのレジストを除去できる条件で
行った。図16から、注入エネルギー20keVでアルゴンイ
オンを注入した場合、改質SOG膜の内部の有機SOG
膜は改質されずに残っていることが分かった。さらに、
改質SOG膜のメチル基の量が変化しないことが分かっ
た。この結果、イオンをドーズする深さが極限領域で
あっても、アッシング特性が向上することが分かった。

【0084】<B-4. 水分透過性と吸湿度>有機SO
G膜6を酸素プラズマに晒すことによって改質された有
機SOG膜6、改質していない有機SOG膜6の吸湿度
について比較した。図17に、それぞれの改質処理前
後、および改質後にクリンルーム内で大気中に放置
し、膜中の水分を計測した結果を示す。膜中の水分量
は、赤外線吸収スペクトルのO-Hに関する吸収(3500cm⁻¹
付近)の面積強度を指標とした。このときのイオン種
はアルゴンであり、注入エネルギーは100keVである。酸素
プラズマに晒した場合、処理前後での水分増加だけでな
く、1日後でも水分が増加していることが分かった。一
方、イオン注入の場合には、イオン注入後に増加してい
ないだけでなく、クリンルーム内で大気中に放置して
も水分の増加は小さい。さらに、イオン注入した場合、
改質しなかったものよりも吸湿度が少なかった。

【0085】イオン注入した場合に吸湿度が少ない原因と
して、以下の膜構造が関係していると考えられる。
(1) B-2、述べたように、イオン注入した膜中に多
くのSi-H結合をもつ(但しDoki, H. Watanabe, Y. F
urumura, Proc. of IEEE VLSI, p. 235(1994).参照)。

一方、酸素プラズマによるメチル基の分解は、式(4)
で表される。



ンイオンを注入した場合(加速エネルギー:140keV,ド
ーズ量:1×10¹⁵cm⁻²)、図24は有機SOG膜6にド
ーズイオンを注入した場合(加速エネルギー:140keV,ド
ーズ量:1×10¹⁵cm⁻²)、図25は有機SOG膜6に酸
素プラズマ処理が施された場合(酸素プラズマ処理の条
件は図44におけるそれと同じ)を示す。

【0093】図20に示すように、有機SOG膜6に何
れかのイオン注入した場合、リセスが発生している。
しかし、図21～図24に示すように有機SOG膜6に
イオン注入が行われた場合には、図25に示す酸素プラ
ズマ処理が施された場合と同様に、リセスは発生してい
ない。この結果からも、改質SOG膜7には有機成分が
含まれていないことがわかる。また、酸素イオンの注入
についても、上記の各イオンと同様の効果があることが
わかる。

【0094】上記のA、～Dの結果をまとめると以下の
ようになる。改質SOG膜7の構造に関して以下のこ
とが分かった。

- (1) C-H結合は減少する。
- (2) Si-O結合の減少は比較的小さい。
- (3) Si-H結合が存在する。
- (4) 酸素は膜中に残留している。

【0095】5. 膜中のダンダリングボンドの数のほと
んどが酸素のものである。

(6) ダンダリングボンドの数は膜中の酸素原子の約1
2倍程度少ない。

改質SOG膜7の安定性について、イオンを注入しな
かった有機SOG膜6の結果と比較して、以下のことが分
かった。

【0097】(1) 耐熱性では、800℃まで膜厚減少がな
い。昇温しても水やOHの脱離量は少ない。但し、本素
や酸素化合物は比較的多く脱離する。

【0098】(2) プラズマ(特にレジストのアッシング条件)に晒し
ても、膜厚減少が生じない。

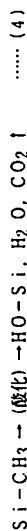
改質SOG膜7の吸湿度は小さく、水分の透過は少な
くなる。

改質SOG膜7の吸湿度は以下で以下のことが分か
た。

- (1) イオンを注入すると吸湿度は高くなる。
- (2) 注入するイオンに依存せず、比誘電率
は3.5になった。改質SOG膜7を窒素プラズマに晒
した場合、図2(c)に示すようにビアホール9の周
壁に改質SOG膜7が露出する構造であっても、図21
～図25に示すようにリセスが発生することはない。良
なビアホール9の断面形状が得られることを確認した。



一方、酸素プラズマによるメチル基の分解は、式(4)
で表される。



【0100】次に、上記のA、～D、を測定するため
に、以下の各種特性について測定した結果を示す。図2
6および図27に、改質SOG膜7におけるドーズ量
の違いによる膜厚減少の割合を示す。これより、ド
ーズ量は1×10¹⁵cm⁻²以上必要であることがわかる。

【0101】図28に、改質SOG膜7におけるリセ
ス量のドーズ量依存性を示す。但し、有機SOG膜6の
膜厚は、イオン注入無し、ドーズ量:1×10¹⁵cm⁻²、
1×10¹⁶cm⁻²については2500Åであり、ドーズ量:1×10¹⁴
cm⁻²については3000Åである。ドーズ量:1×10¹⁴cm⁻²
では、有機SOG膜6の膜厚が約10%も増加するリセ
ス量が多いことから、膜厚が大きいことがわかる。

【0102】図29に、改質SOG膜7におけるド
ーズ量の違いによる赤外線吸収スペクトルの変化を示す。イ
オン注入無し(有機SOG膜6)、ドーズ量:1×10¹⁴cm⁻²
ではC-Hのピークが大きくなり、有機成分が多くな
っている。また、ドーズ量:1×10¹⁴cm⁻²ではO-Hのピー
クが大きくなり、膜が水分を吸収するか又は膜中で
水分が生成されていることがわかる。それに対して、ド
ーズ量:1×10¹⁵cm⁻²、1×10¹⁶cm⁻²ではO-Hのピー
クが小さくなり、水分が少なくなり膜厚が増えること
がわかる。

【0103】図30に、改質SOG膜7の熱処理による
高周波で特性の変化を示す。改質SOG膜7は熱処理を
施しても特性カーブがほとんど変化しないことから、熱
的に安定であることがわかる。但し、熱処理を施すと、
ヒステリシスは若干大きくなる。

【0104】図31に、熱処理温度の違いによる酸素ブ
ラズマ耐性を示す。改質SOG膜7は酸素プラズマ処理
を施して熱処理温度を上げても誘電率がほとんど変化し
ない。これより、良質で安定な膜であることがわかる。

【0105】図32に、ドーズ量の違いによる酸素プラ
ズマ耐性を示す。ドーズ量:1×10¹⁴cm⁻²では酸素プラ
ズマ処理を施すと誘電率が大幅に増加し、イオン注入無
し(有機SOG膜6)と同程度になる。これより、酸素
プラズマに晒す向上させるには、有機SOG膜6中の有
機成分をイオン注入によって分解することが重要である
ことがわかる。

【0106】図33に、改質SOG膜7のXPS (X-ra
y Photoemission Spectroscopy) スペクトル (C1s) を
示す。改質SOG膜7中にはC-C結合およびC-O結
合が存在する。これより、前述した図17における推察
が正しいことがわかる。

【0107】尚、イオン注入によるメチル基の分解は、
式(3)で表される。



一方、酸素プラズマによるメチル基の分解は、式(4)
で表される。



う。この場合には、無機SOG膜に含まれる水分および水酸基を低減させることができる。

【0136】(7) 改質SOG膜7をバッシンベシジョンとして使用する。この場合、デバイスを機械的・化学的に研磨に配慮することが可能な優れたバッシンベシジョンを得ることができる。

【0137】(8) 改質SOG膜7を多層膜構造において各膜間の各膜間絶縁膜に用いる場合、有膜SOG膜6へのイオン注入は以下の方法を用いてもよい。

(a) 各層の改質SOG膜6を形成する度にイオン注入を行う。例えば、2層の改質SOG膜7を形成する場合には、1層目の配線に1層目の有膜SOG膜6を形成後にイオン注入を行って1層目の改質SOG膜7を形成し、次に、2層目の配線を形成し、続いて、2層目の配線の上に2層目の有膜SOG膜6を形成後にイオン注入を行って2層目の改質SOG膜7を形成する。

【0138】(b) 全層の改質SOG膜6を形成した後で一括してイオン注入を行う。例えば、2層の改質SOG膜7を形成する場合には、1層目の配線の上に1層目の有膜SOG膜6を形成し、次に、2層目の配線を形成し、続いて、2層目の配線の上に2層目の有膜SOG膜6を形成し、最後に、デバイス表面にイオン注入を行うことで、1層目および2層目の有膜SOG膜6をそれぞれ改質SOG膜7とする。

【0139】以上、各実施形態について説明したが、各実施形態から把握できる請求項以外の技術思想について以下に記載する。

(4) 請求項1〜5のいずれか1項に記載の半導体装置の製造方法において、前記SOG膜の下層に絶縁膜を形成する工程と、前記SOG膜の上層に絶縁膜を形成する工程とを備えた半導体装置の製造方法。

【0140】(ロ) 請求項6に記載の半導体装置において、前記SOG膜の下層に形成された絶縁膜と、前記SOG膜の上層に形成された絶縁膜とを備えた半導体装置。このようにすれば、上層および下層の絶縁膜でSOG膜が挟まれたサンドウィッチ構造の層間絶縁膜を形成することができる。

【0141】

【発明の効果】

1) SOG膜に含まれる水分および水酸基を減少させることが可能な半導体装置の製造方法を提供することができる。

【0142】2) SOG膜に含まれる有機成分を分解させると共に、膜中に含まれる水分および水酸基を減少させることが可能な半導体装置の製造方法を提供することができる。

【0143】3) 平坦性に優れ、ボイスノイズなどの不良を回避することが可能な層間絶縁膜を備えた半導体装置を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 第1実施形態の製造方法を説明するための図解断面図。

【図2】 第1実施形態の製造方法を説明するための図解断面図。

【図3】 第2実施形態の製造方法を説明するための図解断面図。

【図4】 第2実施形態の製造方法を説明するための図解断面図。

【図5】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図6】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図7】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図8】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図9】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図10】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図11】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図12】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図13】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図14】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図15】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図16】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図17】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図18】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図19】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図20】 第1、2実施形態のデバイスの断面状態を示す顕微鏡写真。

【図21】 第1、2実施形態のデバイスの断面状態を示す顕微鏡写真。

【図22】 第1、2実施形態のデバイスの断面状態を示す顕微鏡写真。

【図23】 第1、2実施形態のデバイスの断面状態を示す顕微鏡写真。

【図24】 第1、2実施形態のデバイスの断面状態を示す顕微鏡写真。

【図25】 第1、2実施形態のデバイスの断面状態を示す顕微鏡写真。

【図26】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図27】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図28】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図29】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図30】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図31】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図32】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図33】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図34】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図35】 第1、2実施形態のデバイスの断面状態を示す顕微鏡写真。

【図36】 第1、2実施形態のデバイスの断面状態を示す顕微鏡写真。

【図37】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図38】 第1、2実施形態のデバイスの断面状態を示す顕微鏡写真。

【図39】 第1、2実施形態のデバイスの断面状態を示す顕微鏡写真。

【図40】 第1、2実施形態のデバイスの断面状態を示す顕微鏡写真。

【図41】 第1、2実施形態を説明するための特性図。

【図11】

(a)

(b)

(c)

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

【図2】

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

(h)

(i)

(j)

(k)

(l)

(m)

(n)

(o)

(p)

(q)

(r)

(s)

(t)

(u)

(v)

(w)

(x)

(y)

(z)

(aa)

(ab)

(ac)

(ad)

(ae)

(af)

(ag)

(ah)

(ai)

(aj)

(ak)

(al)

(am)

(an)

(ao)

(ap)

(aq)

(ar)

(as)

(at)

(au)

(av)

(aw)

(ax)

(ay)

(az)

【図11】

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

【図10】

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

【図11】

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

【図12】

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

イオン注入

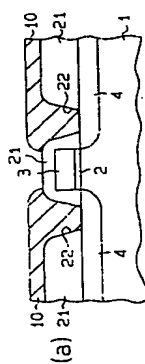
イオン注入

イオン注入

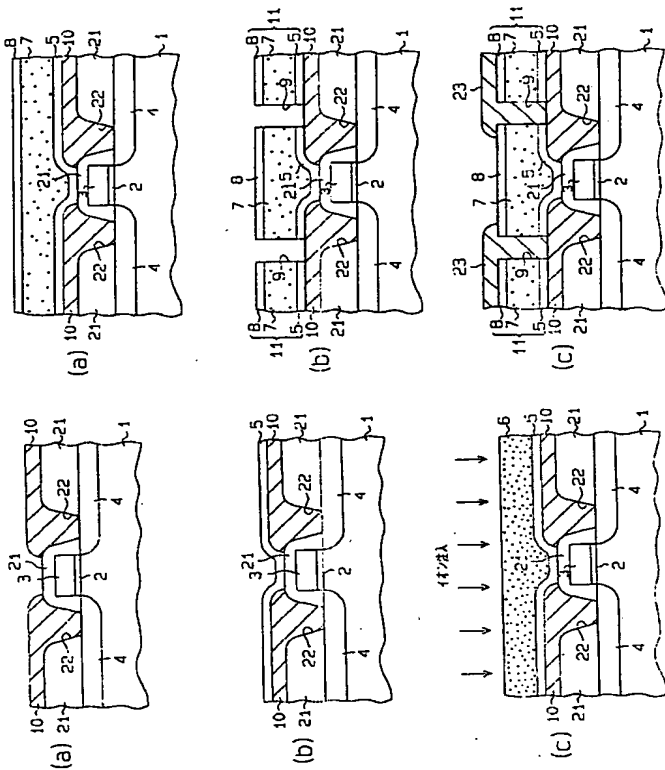
イオン注入

イオン注入

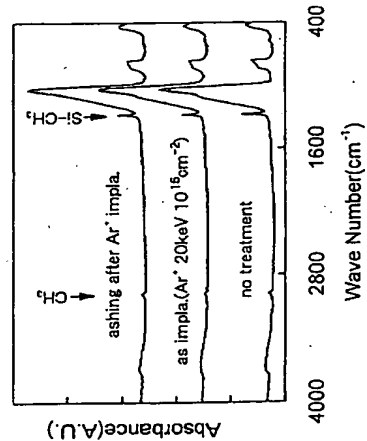
【図3】



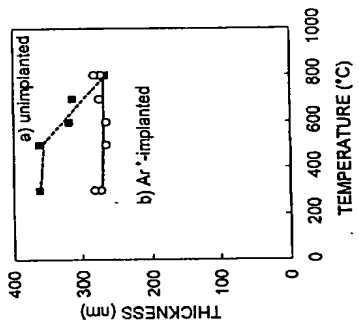
【図4】



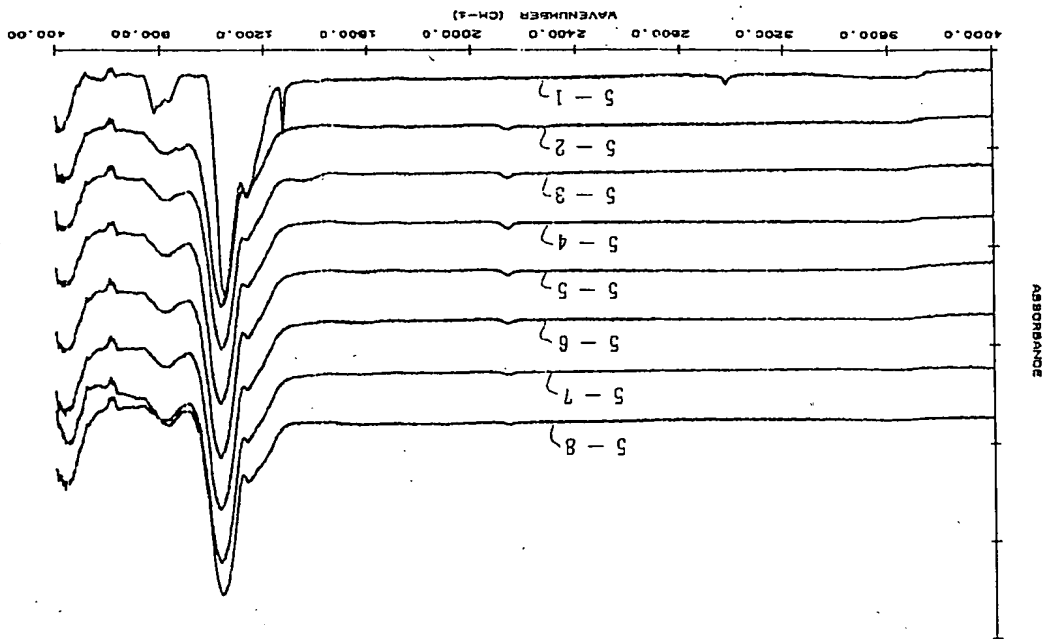
【図9】



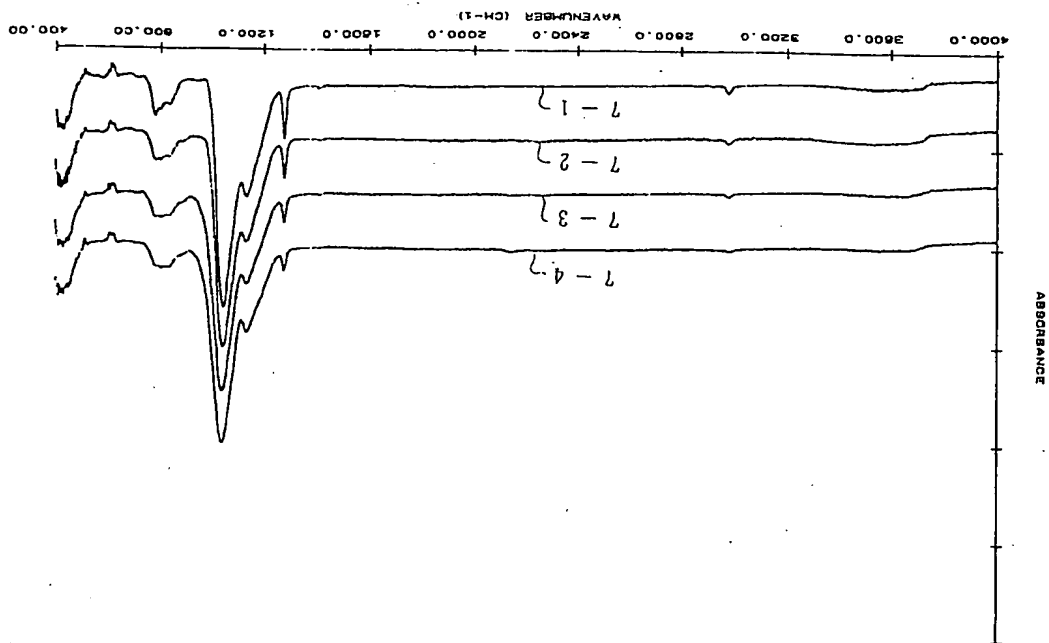
【図12】



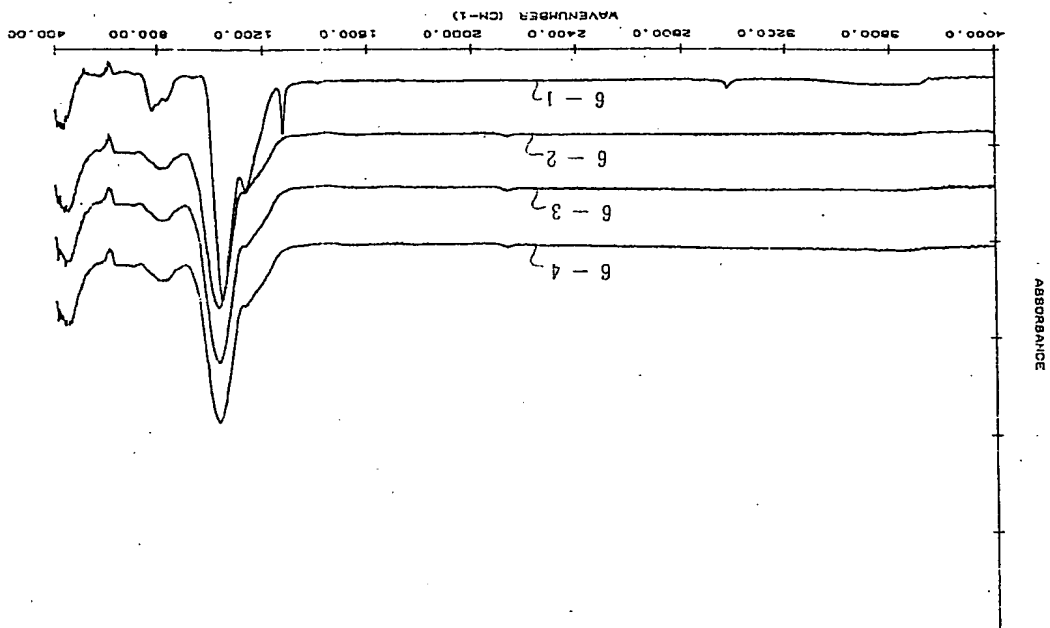
【図5】



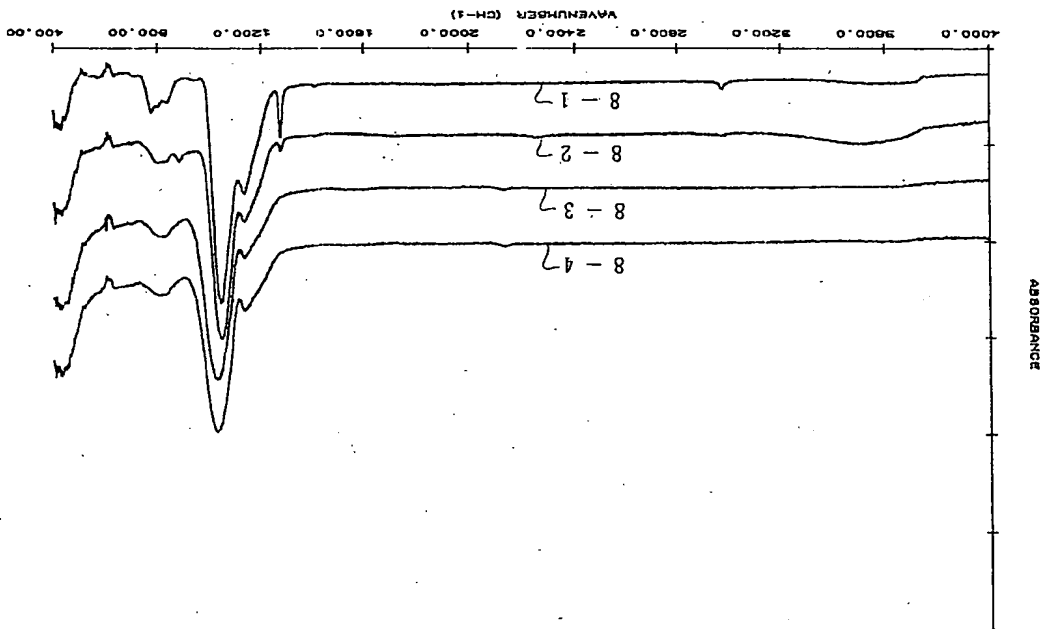
[147]



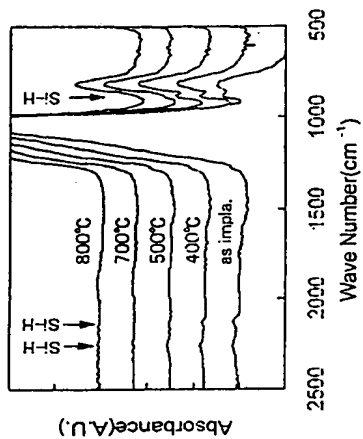
[146]



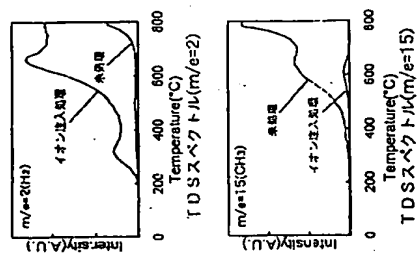
【図8】



【図13】



【図14】



【図15】

